作业中断对任务绩效的影响及心理疲劳的调节作用

陈悦源[1,2]，方卫宁[1*]，郭北苑[1]，鲍海峰[1]

（1. 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室，北京，100044;

2 北京交通大学机械与电子控制工程学院，北京，100044）

摘要 作业中断会对中断后行为绩效产生影响，探讨不同疲劳状态下中断对作业绩效影响的认知机制将有助于完善和发展中断的认知理论。本研究采用事件相关电位(ERP)，通过在不同心理疲劳状态下执行数学题任务中断、暂停中断和不中断的空间 2-back 任务，结合行为数据和 ERPs 结果，分析作业中断对任务绩效的影响以及心理疲劳在其中的调节作用。实验结果发现，中断后诱发的 P200 和 P300 振幅显著提高，作业中断使得主任务的注意力资源下降，任务中断的无关信息干扰了主任务工作记忆，而疲劳状态则进一步加剧了中断对注意资源、工作记忆及行为绩效的负面效应。本研究在揭示作业中断认知过程及疲劳对其影响机理的同时，也支持了中断的目标记忆模型。

关键词 作业中断, 工作记忆, 注意加工, 疲劳

1 引言

作业中断是指任何干扰工作连续性且与主任务不直接相关的事件(Laarni, 2021)，可以理解为正在执行任务的行为表现或人员注意力的意外中止(Puranik et al., 2020)。大部分关于中断对主任务绩效影响的研究表明中断会导致主任务绩效下降，主要是由于中断后主任务恢复的延迟造成的(王磊, 伍麟, 2012)。但也存在少数研究认为，中断在一定程度上对任务完成存在积极作用，可以促进简单任务的执行，却会对复杂性较高的任务产生负面效应(Speier et al., 2003)。

基于 ACT*认知结构(Anderson, 1983)所提出的目标记忆模型(Memory for Goals, MFG)是目前接受度最广的中断认知模型。该模型认为在中断后短时间内绩效下降的主要原因是由于中断造成了人员对主任务记忆激活程度的降低(Altmann & Trafton, 2002)，因而在返回主任务后的一段时间，需要克服中断任务的干扰来恢复对主任务记忆的激活程度(Saxby et al., 2013)，从而出现了中断后恢复延迟。MFG 模型的“目标”作为工作记忆的元素之一指的是一种意图的心理表征，即完成一项任务、达到某个特定的状态或采取某种心理、物理行动(Heath et al., 1999)。如图 1 所示，目标 1 为主任务，当中断任务(目标 2)出现后这个新目标的激活程

收稿日期: 2021-05-28
* 北京市自然科学基金-丰台轨道交通前沿研究联合基金(L191018)资助。
通信作者: 方卫宁, E-mail: wnfang@bjtu.edu.cn

度快速增高以指导行为，而原目标 1 的记忆激活水平降低，且随着中断时长增加激活水平逐渐降低(Monk et al., 2008)。结束中断返回主任务时需要对目标 1 的记忆重新检索与激活，当目标 1 激活水平高于中断目标 2 的干扰水平后便返回主任务的执行阶段。

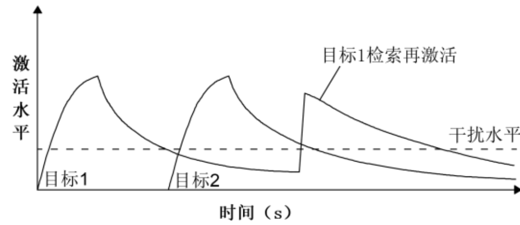


图 1 目标记忆模型

目前关于中断认知理论的探究大多采用实验法通过行为绩效数据来反映各因素与中断之间的相关性，较少从生理层面探究中断是如何影响工作绩效的。Rejer 和 Jankowski (2017) 研究了广告弹窗对阅读任务的影响，通过分析广告出现前、展示时与消失后的脑电(Electroencephalogram, EEG)变化，发现广告中断降低了被试注意力，引发大脑前额叶区域 Beta 波活动整体下降，导致了前额叶不对称指数的显著变化。Kalgotra 等人(2019)探究了音频中断对阅读任务的影响，结果显示任务中断会引发多个脑区的变化，其中额叶、颞叶和岛叶的活动与中断关系最为密切。一些基于典型心理学范式的研究表明，中断对工作记忆具有破坏性，被中断的工作记忆没有保留而是在中断后重新激活(Clapp et al., 2010)。Hakim 等人(2020)研究了任务无关中断对工作记忆神经表征的影响，发现在中断后注意力发生转移，在任务恢复后工作记忆从离线存储中检索信息。有学者应用延迟识别范式证实了最佳工作记忆依赖于通过神经抑制有效过滤无关信息，从而防止有限的记忆容量过载(Berry et al., 2009)。Zickerick 等人(2020, 2021)研究了连续数字记忆任务中断前后的 ERP 成分变化，表明中断后 P300 平均波幅显著高于中断前。但正如 Kalgotra 等人(2019)所述，目前关于任务中断时大脑活动的整体认知非常有限，因而还需要在这一领域开展更多新的研究。且通过既有的研究发现，中断对人员的注意力和工作记忆均产生影响，但如何区别这两种认知机制对于作业绩效的影响以及各自的影响效应是怎样的，目前还尚未有相关研究工作开展。

在中断影响因素研究中，相较于中断频率、中断时长、任务相似性等任务特征因素，对于个体特征因素的研究较为缺乏。既有的关于个体特征的研究均为人员固有属性特征，例如个体能力差异(Meys & Sanderson, 2013)、年龄(Monk et al., 2004)与性别(Kalgotra et al., 2019)等，这些特征不会随着任务和环境的改变在短期内发生变化。在诸多领域的人机交互作业中，长时间的监控作业已成为常态，有些还处于地下空间、密闭空间等恶劣环境中，极易引发人员的心理疲劳(Mental Fatigue)，且疲劳状态会随着作业的执行发生改变，对作业绩效产生影

响。可关于疲劳状态对于中断后工作记忆及其相关绩效的影响研究到目前为止几乎没有。Westbrook 等人(2018)虽然在急诊医师中断情境中考虑了疲劳因素，但仅分析了中断和疲劳对处方错误的主效应，忽略了二者交互作用。一些学者研究了工作负荷对中断位置的影响，认为当工作负荷最低时，中断对绩效的破坏性最小(Iqbal & Bailey, 2005)。虽然工作负荷和疲劳之间有着密切关系，但并非同一概念(Abe et al., 2009)，工作负荷是从任务的角度来衡量的客观指标，而疲劳则是人员的主观状态，因此研究结果无法直接说明疲劳对中断后工作绩效的影响效应。

综上所述，目前关于作业中断对于中断后任务绩效的影响仍然存在争议，从生理层面对中断影响作业绩效的机制研究仍处于初始阶段，疲劳作为关键的个体特征因素对于作业中断的影响尚不明晰。基于此，本研究采用高时间分辨率的 ERP 测量，探究疲劳对作业中断过程的影响。由于作业中断与不相关信息抑制、注意转换以及工作记忆编码、维持和提取有关(Van der Linden et al., 2003)，而 n-back 任务包含了对所记忆信息的在线编码、更新和维护过程，能够较全面地反映注意转移和工作记忆的关键过程(Owen et al., 2005)。因此选择空间 2-back 作为中断实验的主任务，设计简单数学题为任务中断。以往的研究仅探究了次要任务中断对后续绩效的影响，而忽视了暂停中断的影响效应。根据中断的定义，作业中断不仅指被突然出现的次要任务所打断的现象，也包括在工作完成前工作流的暂停所导致的注意力的意外中止。因此，为了区分和比较注意力转移和工作记忆激活程度降低对工作绩效各自的影响效应，设计了无注意转移和操作的暂停中断。通过分析中断前后大脑活动变化，比较不同类型中断的影响差异，探究中断对工作绩效的影响机制。基于 AX-CPT 任务诱发被试心理疲劳状态，研究疲劳和非疲劳状态下中断对大脑活动的影响，探究疲劳在中断过程中的调节效应，从而为实际人机交互作业环境的中断管理问题提供理论支撑。

研究将重点分析由空间 2-back 任务诱发的 P200 和 P300 成分(Han et al., 2013)。P300 受注意力分配和工作记忆所调节(Lin et al., 2020; Polich, 2007)，反映了大脑对资源的中央调控。P300 振幅对双任务中所使用的注意资源量敏感，当出现多个任务竞争时，注意资源需要被分配到不同任务中，从而使 P300 振幅减小，峰值潜伏期变长(肖英霞, 2015)。而也有研究表明，改变刺激注意和需要记忆处理的任务会影响 P300 振幅，随着记忆负荷的增加、任务加工需求的增长，后续的注意资源投入会使得 P300 振幅增加(Kok, 2001)。受到充分注意的刺激能够促进成功的工作记忆存储、检索和识别，也会产生更大的 P300 振幅(Polich, 2007)。同时 P300 作为评价工作记忆任务下心理疲劳模型的有效指标，研究表明随着心理疲劳的加深，P300 振幅出现明显下降(范晓丽 等, 2018)，能够在一定程度上说明心理疲劳的产生对人

员的注意力和工作记忆造成了损害。心理疲劳会导致脑额叶执行功能减弱，从而造成目标定向注意力减少，使人员更容易出现刺激驱动注意方式(Boksem et al., 2005)，选择注意能力的下降(张淼, 2009)，可能表现为对不相关信息的抑制能力减弱（Faber et al., 2012）。由于工作记忆涉及了信息编码、信息维持和信息检索提取三个阶段(杨平, 2018)，随着疲劳程度的加深，自上而下注意控制能力削弱，工作记忆也会随之受到影响(廖慧云, 2017)。相比 P300 成分，目前关于 P200 的研究相对较少，P200 被认为是对视觉刺激反应的成分，已经被证实与视觉搜索、注意力和工作记忆有关，反映了信息处理的早期阶段(Ciecko-Michalska et al., 2012)，并与信息的有效选择、注意操作以及记忆识别联系紧密(Lenartowicz et al., 2010)，其振幅随着人员注意力水平的增加而降低(Crowley & Colrain, 2004)。在一项关于死记硬背和精化记忆任务的研究中，实验结果表明了后续记忆较少的被试比记忆较多的被试在额叶的 P200 振幅更大，在顶枕叶振幅更小(Dunn et al., 1998)。

结合以往的研究来看，中断后需要将注意力从中断任务转移回主任务，抑制干扰信息并对主任务的相关工作记忆进行重新提取，因此提出假设：(1)中断前和中断后 P200 和 P300 振幅会有显著差异，中断后 P200 和 P300 的振幅高于中断前；(2)疲劳状态下认知功能受损，中断后的 P200 和 P300 振幅相比非疲劳状态更低。

2 方法

2.1 被试

基于 G.Power 计算中等效应量(f = 0.25)，在统计检验力 1 - β = 0.80, α = 0.05 的前提下，执行重复测量方差分析所需实验样本量为 18 人次，实际统计功效达到 0.812，critical F 值为 3.16。因此召集了 20 名本科生和研究生参与实验，包括 11 名女生，9 名男生，年龄从 22 岁至 29 岁(M = 24.30, SD = 1.82)。所有被试均为右利手，无行为和认知障碍，视力或矫正视力达 1.0。告知被试实验前 24 小时禁止饮用酒、茶、咖啡或其他功能性饮料，并保证正常睡眠时间。实验开始前要求被试清洁头皮，讲解实验注意事项并签署知情同意书，完成实验后获取相应酬劳。

2.2 实验刺激和实验任务

本研究使用 E-Prime 3.0，基于空间 2-back 工作记忆范式设计并编制中断实验任务。将 2-back 作为主要任务，刺激材料为白色背景下的黑色小正方形，随机出现在显示画面九宫格中除中心位置外的其余八个位置之一，刺激材料呈现时间 500 ms，刺激间隔 2000 ms (Brouwer et al., 2012)，被试将当前所呈现的刺激与之前倒数第 2 个刺激进行比较，并按下键盘的“f”和“j”分别响应“匹配”与“不匹配”的比较结果。每个随机位置方块的刺激都被视为一个

“目标”记忆，需要记忆后进行判断匹配。在执行 2-back 主任务期间，通过插入中断来打断该任务，采用立即中断策略(McFarlane, 2002)。实验设计了任务中断和暂停中断 2 种任务类型，一方面能够探究暂停中断对中断后绩效的影响效应和机制，另一方面通过设定相同时长的暂停中断和任务中断，并比较二者的差异，进一步分析次要不相关任务的干扰对后续工作记忆和相关行为绩效的影响作用。

如图 2 所示，任务中断将简单数学题的正误判断作为次要任务，采用与 2-back 任务同样的刺激和间隔呈现时长，一次任务中断包含 5 个数学题试次，被试按下键盘的“f”和“j”分别响应“正确”与“错误”的判断结果。中断结束后，立即返回 2-back 主任务，要求被试判断中断后出现的第一个 2-back 试次是否与中断前倒数第二个试次相匹配；判断中断后第二个试次是否与中断前最后一个试次相匹配(如图 2 虚线箭头)；之后继续正常执行 2-back 任务。将每次中断后出现的前两个 2-back 试次视为中断后试次，其余 2-back 试次为中断前试次，如图 3。暂停中断，即无需任何操作的长时间注视，暂停时长与数学题任务中断总时长保持一致，以对比分析中断期间不相关信息的干扰对绩效和 ERP 成分的影响。两次中断之间包括 2 个中断后和 12 个中断前试次，任务中断和暂停中断情况下均包含 312 个中断前试次和 48 个中断后试次。实验设置对照的不中断基线任务，即 2-back 任务，包含 320 个 2-back 试次，以用于比较有无中断情况下主任务绩效的差别。

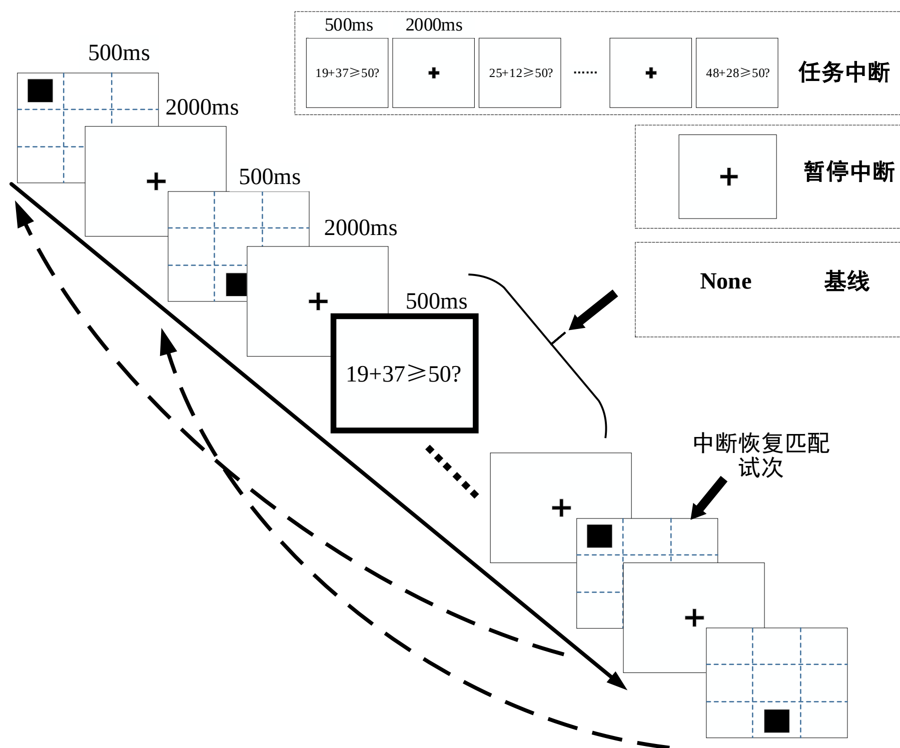


图 2 基于空间 2-back 范式的中断实验任务设计

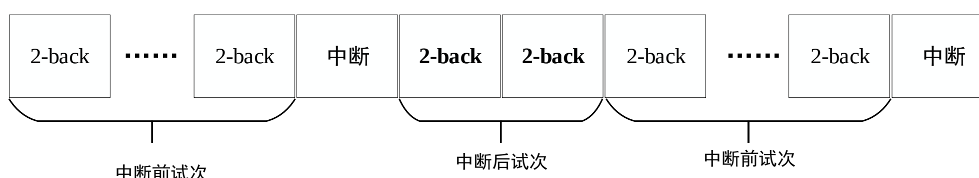


图 3 中断实验试次划分

使用图 4 所示的持续性操作任务(AX-CPT)诱发被试心理疲劳状态(Linden et al., 2006)。该范式由线索刺激和探测刺激组成，刺激材料为剔除“K”与“Y”之后的 24 个英文字母(K、Y 同 X 相似)。每次呈现一个字母，四个字母为一组，其中第一个为红色线索刺激(仅 A 为有效线索)，最后一个为红色探测字母(仅 X 为有效探测)，中间随机呈现 2 个非 A 和非 X 的白色干扰刺激。程序包含四类不同的试次，目标试次为“有效线索-干扰字母-有效探测”，即“A”-“随机干扰”-“随机干扰”-“X”。非目标试次被分为三类，分别为“无效线索-两次随机干扰-有效探测”、“无效线索-两次随机干扰-无效探测”、“有效线索-两次随机干扰-无效探测”。目标试次呈现概率为 70%，其他各类非目标试次均为 10%。线索、探测和干扰刺激呈现时长均为 200 ms，每组之间留有 1000 ms 间隔用于被试响应。要求被试对目标试次按下“f”键响应，其他非目标试次按“j”键响应。

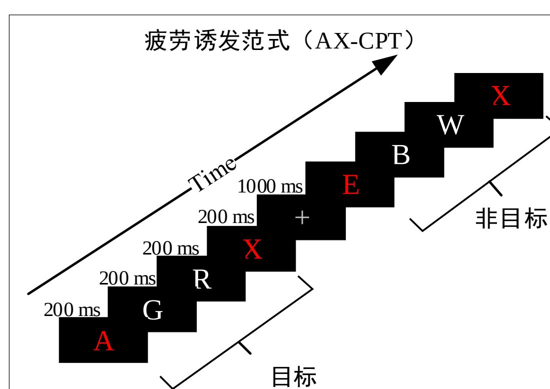


图 4 疲劳诱发范式 AX-CPT

正式实验前，要求被试对于任务中断、暂停中断和不中断基线三类型任务均进行充分练习，以避免正式实验中产生学习效应。正式实验分为疲劳和非疲劳两个阶段，采用随机顺序分两天进行。疲劳阶段正式实验首先要求被试执行 100 min 的 AX-CPT 以保证心理疲劳状态的成功诱发(Marcora et al., 2009)，每间隔 20 min 检查 AX-CPT 任务正确率，当正确率高于 85%时，此时段才被计为有效诱发时间。中断实验开始前填写斯坦福困倦量表(Stanford Sleepiness Scale, SSS)以评估被试的疲劳状态，每阶段实验内被试均需要完成任务中断、暂停中断和基线不中断三组任务，实验顺序采用拉丁方平衡设计，每组任务完成后填写 NASA-TLX 量表，用于主观脑力负荷的评估。

2.3 ERPs 记录和预处理

根据国际 10-20 脑电记录系统，使用 64 导 Ag/AgCl 电极帽采集 EEG 信号。采用 Neuroscan SynAmps2 放大器，AC 采集，采样率为 1000 Hz，GND 为接地电极，数据采集时选取 CPz 为参考电极，离线分析时转换为双侧乳突参考。在左眼上方和下方安置电极记录垂直眼电(VEOG)，两眼外眦外侧分别放置电极记录水平眼电(HEOG)，以监测眼动和眨眼情况，所有电极阻抗均保持在 5kΩ 以下。利用 MATLAB 的 EEGLAB 工具箱进行离线数据分析，滤波带宽为 0.1~30 Hz (Hruby & Marsalek, 2002)，分析时程(epoch)为 1000 ms，包括刺激呈现前 200 ms 至刺激成呈现后 800 ms。基于独立成分分析去除眼动伪迹，并采用±75 μV 阈限去除含有运动伪迹的试次。

本研究主要分析 ERP 成分为 P200 和 P300，根据先前相关研究结果和对总平均图的分析，选取额区(F3、Fz、F4)、中央区(C3、Cz、C4)和顶区(P3、Pz、P4)作为 ERP 分析电极点(Forester et al., 2020; Vilà-Balló et al., 2018)，通过对所有数据的目视检查选取 P200 时间窗为刺激出现后的 180~280 ms，P300 时间窗为刺激出现后的 300~450 ms，保证各波形峰值点在时间窗内。对同一实验条件下(任务中断组、暂停中断组和基线组)的所有同类型试次进行叠加。去伪迹后，用于叠加的试次平均接受率为 89.79%。

2.4 数据处理与分析

行为数据包括 E-prime 3.0 软件记录的三类型任务的反应时间(RTs)和准确率(ACC)，基于 NASA-TLX 量表评估主观脑力负荷。ERP 数据包括 P200 和 P300 平均振幅和峰值潜伏期。首先通过 2(疲劳状态：疲劳，不疲劳)×3 任务类型(任务中断、暂停中断、基线不中断)的两因素重复测量方差分析，分别分析不同中断类型对于中断前、后主任务绩效的影响。之后采用 2(疲劳状态：疲劳，不疲劳)×2(任务类型：任务中断，暂停中断)×2(试次类型：中断前，中断后)的三因素重复测量方差分析，分别分析行为数据和 ERP 指标在额区、中央区和顶区的差异。使用 Greenhouse-Geisser 法对方差分析结果不满足球形度检验的数据进行校正，显著性水平 p 值设定为 0.05，效应大小使用η_p^2表示。一名被试的数据由于实验过程中眼动和运动伪迹过多且正确率过低而被剔除，对剩余 19 名被试的数据进行分析。

3 结果

3.1 行为数据

被试行为绩效数据描述统计结果见表 1。对中断前、后主任务绩效的两因素重复测量方差分析结果显示，任务中断、暂停中断的中断前试次与基线 2-back 试次的正确率之间没有表现出显著性差异，$F(2, 36) = 3.75$，$p = 0.063$，而两种中断任务的中断后试次正确率则显

著低于基线试次，$F(2, 36) = 5.94$，$p = 0.006$，$\eta_p^2 = 0.25$。但令人意外的是，当仅比较中断前试次时，在非疲劳状态下，任务中断和暂停中断任务的中断前试次显著高于基线任务 2-back 试次的正确率，$F(2, 36) = 4.25$，$p = 0.022$，$\eta_p^2 = 0.19$，在疲劳状态下并没有出现这种现象，$F(2, 36) = 2.23$，$p = 0.123$。

对反应时分析结果显示，任务中断、暂停中断的中断前试次与基线任务 2-back 试次的反应时之间没有显著性差异，$F(2, 36) = 2.04$，$p = 0.145$，而任务中断、暂停中断的中断后试次反应时则显著大于基线任务，$F(2, 36) = 14.78$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.45$。

表 1 行为绩效描述性统计结果

疲劳状态	任务类型	试次类型	正确率（%, M±SD）	反应时（ms, M±SD）
不疲劳	任务中断	中断前	98±3	594.55±143.29
		中断后	89±11	722.95±132.38
	暂停中断	中断前	97±3	604.17±142.46
		中断后	92±12	696.47±146.45
	基线任务	——	95±5	621.67±157.42
疲劳	任务中断	中断前	95±5	685.48±146.06
		中断后	83±17	848.49±193.35
	暂停中断	中断前	95±4	710.20±154.31
		中断后	85±14	782.04±153.78
	基线任务	——	92±8	712.86±143.32

三因素重复测量方差分析结果显示，疲劳的主效应显著，$F(1, 18) = 13.03$，$p = 0.002$，$\eta_p^2 = 0.43$，疲劳状态下的正确率显著低于非疲劳状态；试次类型主效应显著，$F(1, 18) = 15.35$，$p = 0.001$，$\eta_p^2 = 0.46$，中断后试次的正确率低于中断前试次；且二者存在显著的交互作用，$F(1, 18) = 11.03$，$p = 0.004$，$\eta_p^2 = 0.38$，如图 5 所示，疲劳状态下中断后试次相比非疲劳状态正确率更低。中断类型的主效应不显著，$F(1, 18) = 2.12$，$p = 0.162$，但在不疲劳状态下，任务中断的正确率显著低于暂停中断，$F(1, 18) = 4.91$，$p = 0.040$，$\eta_p^2 = 0.21$。三因素的交互作用不显著 $F(1, 18) = 0.08$，$p = 0.786$。

对于反应时指标，疲劳主效应显著，$F(1, 18) = 12.35$，$p = 0.002$，$\eta_p^2 = 0.41$，疲劳状态下的反应时显著大于非疲劳状态。试次类型主效应显著，$F(1, 18) = 40.67$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.69$，中断后试次的反应时大于中断前。中断类型主效应不显著，$F(1, 18) = 1.13$，$p = 0.30$。中断类型和试次类型存在显著交互作用，$F(1, 18) = 6.63$，$p = 0.019$，$\eta_p^2 = 0.27$，如图 6，任务中断的中断后试次比暂停中断反应时更长，$F(1, 18) = 4.79$，$p = 0.042$，$\eta_p^2 = 0.21$，在中断前试次中则没有显著差异，$F(1, 18) = 1.26$，$p = 0.276$。三因素的交互作用不显著 $F(1, 18) = 2.57$，$p = 0.127$。

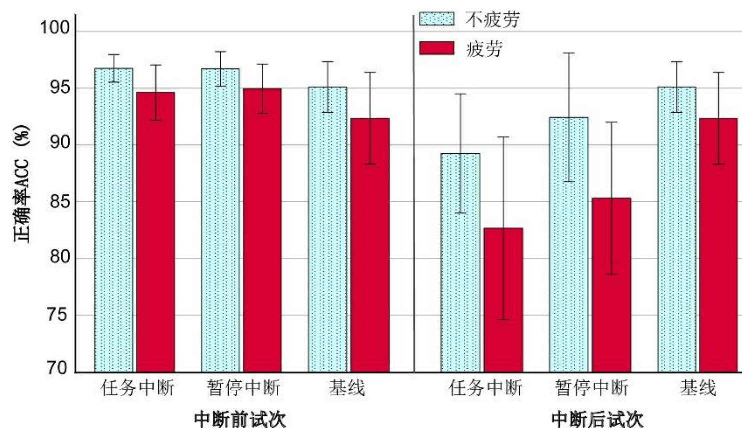


图 5 不同条件下的正确率(误差线表示 95%置信区间)

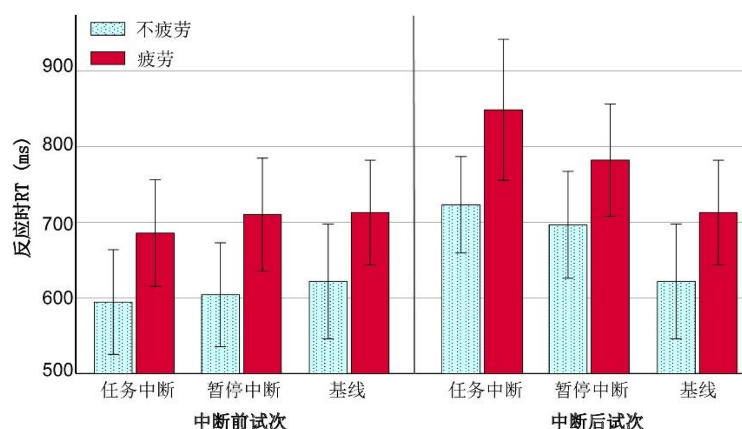


图 6 不同条件下的反应时(误差线表示 95%置信区间)

3.2 主观评分

对疲劳和非疲劳阶段实验前的斯坦福困倦评估分析显示，经过疲劳诱发后的量表评分显著高于非疲劳阶段，$t(18) = -11.05$，$p < 0.001$，证明 AX-CPT 成功诱发了被试的心理疲劳。

对 NASA-TLX 量表进行 2(疲劳状态：不疲劳，疲劳) × 3(任务类型：任务中断，暂停中断，不中断)的两因素重复测量方差分析，结果显示疲劳的主效应显著，$F(1，18) = 34.57$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.66$，疲劳状态下的主观脑力负荷显著高于非疲劳状态，任务类型主效应显著，$F(2，36) = 42.01$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.70$，任务中断脑力负荷高于暂停中断，高于不中断基线任务，二者不存在显著交互作用，$F(2，36) = 0.09$，$p = 0.916$。

3.3 ERP

3.3.1 P200

双因素重复测量方差分析结果显示，中断任务、暂停中断的中断前试次 P200 平均振幅，$F(2，36) = 0.16$，$p = 0.853$，和 P200 峰值潜伏期，$F(2，36) = 0.223$，$p = 0.806$，与基线不中断任务之间均不存在显著性差异。

分别在额区(F3，Fz，F4)、中央区(C3，Cz，C4)和顶区(P3，Pz，P4)对于 P200 平均振幅展开三因素重复测量方差分析。结果表明试次类型的主效应仅在额区，$F(1，18) = 20.165$，

$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.53$，和中央区显著，$F(1，18) = 9.143$，$p = 0.007$，$\eta_p^2 = 0.34$，中断后试次振幅明显高于中断前，在顶叶则没有发现显著的试次效应，$F(1，18) = 0.001$，$p = 0.998$。其他因素主效应和交互效应均没有发现显著性。对于 P200 峰值潜伏期分析发现，额区疲劳状态和试次类型交互作用显著，$F(1，18) = 5.19$，$p = 0.035$，$\eta_p^2 = 0.22$，进一步分析其简单效应显示，仅在疲劳状态下中断后试次潜伏期长于中断前，$F(1，18) = 6.135$，$p = 0.023$，$\eta_p^2 = 0.25$，而非疲劳状态下则没有显著差异，$F(1，18) = 0.023$，$p = 0.881$。在顶区，疲劳状态主效应显著，疲劳状态下 P200 潜伏期显著短于非疲劳状态，$F(1，18) = 6.89$，$p = 0.018$，$\eta_p^2 = 0.29$，其他因素主效应和交互效应均没有发现显著性。波形图和脑地形图见图 7 和图 8。

表 2 P200 和 P300 平均振幅和峰值潜伏期描述性统计结果

疲劳状态	任务类型	试次类型	P200 平均振幅 (μV, M±SD)	P200 峰值潜伏期 (ms, M±SD)	P300 平均振幅 (μV, M±SD)	P300 峰值潜伏期 (ms, M±SD)
不疲劳	任务中断	中断前	3.35±3.45	233±25	4.63±3.19	360±34
		中断后	4.37±3.60	235±25	7.31±3.41	369±28
	暂停中断	中断前	3.55±3.72	235±27	5.31±3.32	360±35
		中断后	4.71±3.84	237±22	4.96±3.67	359±38
	基线任务	——	3.51±3.57	234±26	4.56±3.50	362±30
疲劳	任务中断	中断前	3.90±2.89	228±18	4.04±2.91	359±34
		中断后	4.78±3.22	235±26	6.91±3.80	362±31
	暂停中断	中断前	3.67±2.82	227±22	3.94±3.44	355±32
		中断后	4.68±2.85	235±22	4.47±3.39	362±37
	基线任务	——	3.97±2.69	228±22	4.16±3.12	357±31

3.3.2 P300

首先比较中断前试次的 P300 平均振幅和峰值潜伏期在三类型任务间的差异，结果显示任务中断、暂停中断的中断前试次和不中断任务的 P300 平均振幅，$F(2，36) = 0.44$，$p = 0.647$，及 P300 潜伏期，$F(2，36) = 0.03$，$p = 0.970$，均不存在显著性差异。

分别在额区(F3，Fz，F4)、中央区(C3，Cz，C4)和顶区(P3，Pz，P4)展开三因素重复测量方差分析。对于 P300 平均振幅的分析结果显示，在额区，疲劳状态、任务类型和试次类型主效应均显著：疲劳状态下的振幅相比非疲劳状态更低，$F(1，18) = 5.32$，$p = 0.033$，$\eta_p^2 = 0.23$；任务中断的振幅显著高于暂停中断，$F(1，18) = 5.46$，$p = 0.031$，$\eta_p^2 = 0.23$；中断后试次振幅显著高于中断前试次，$F(1，18) = 25.12$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.58$。中断任务类型和试次类型具有显著交互作用，$F(1，18) = 34.29$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.66$，进一步分析表明，任务中断的中断后试次振幅显著高于中断前，$F(1，18) = 81.40$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.82$，而暂停中断任务不同试次间的振幅差异性则不显著，$F(1，18) = 0.20$，$p = 0.661$。在中央区，任务类

型和试次类型的交互作用显著，$F(1，18) = 45.81$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.72$，简单效应表明中断后试次振幅同样仅在任务中断条件下显著高于中断前，$F(1，18) = 53.29$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.75$，而暂停中断时没有表现出显著性差异，$F(1，18) = 0.13$，$p = 0.725$。在顶区，任务类型，$F(1，18) = 5.46$，$p = 0.032$，$\eta_p^2 = 0.24$，和试次类型主效应显著，$F(1，18) = 8.54$，$p = 0.010$，$\eta_p^2 = 0.33$，且二者交互作用显著，$F(1，18) = 9.85$，$p = 0.006$，$\eta_p^2 = 0.38$。简单效应分析显示任务中断情况下中断后试次显著高于中断前试次，$F(1，18) = 18.50$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.51$，而暂停中断情况下中断前、后试次之间没有显著差异，$F(1，18) = 0.47$，$p = 0.501$。此外还发现疲劳状态下，任务中断诱发的 P300 振幅显著高于暂停中断，$F(1，18) = 6.41$，$p = 0.021$，$\eta_p^2 = 0.27$，而在非疲劳状态下则没有出现同样的效应，$F(1，18) = 1.61$，$p = 0.220$。

P300 峰值潜伏期分析结果显示，试次类型主效应仅在顶区表现出显著性，$F(1，18) = 8.69$，$p = 0.009$，$\eta_p^2 = 0.34$，中断后试次潜伏期晚于中断前，其他主效应和交互效应均不显著。波形图和脑地形图见图 7 和图 9。

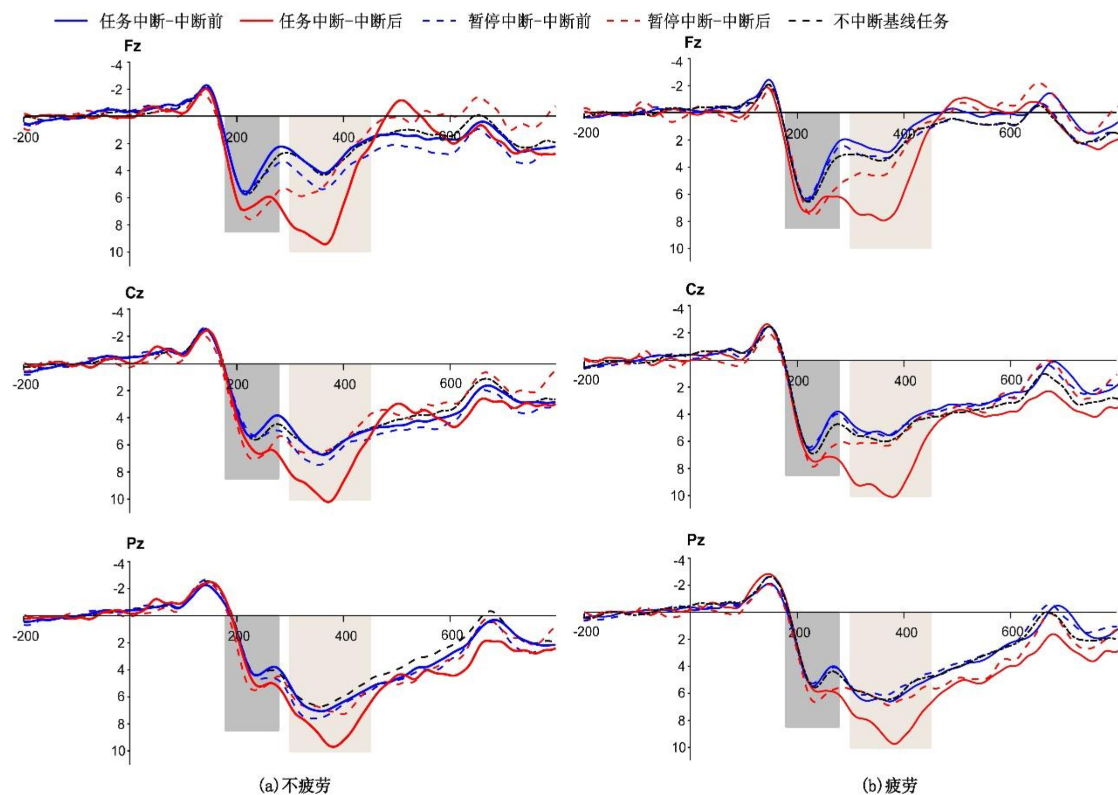


图 7 各条件下 P200 和 P300 成分额区、中央区、顶区 ERP 波形图

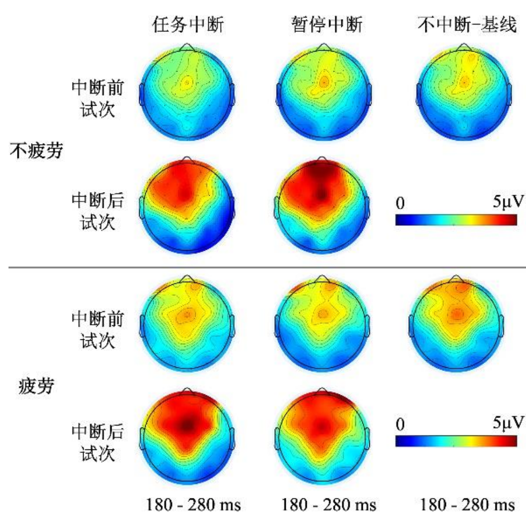


图 8 不同条件下的 P200 地形图

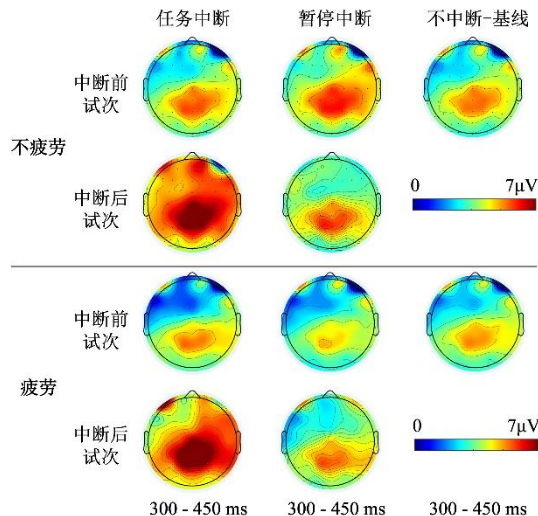


图 9 不同条件下的 P300 地形图

4 讨论

本研究的目的在于明确任务中断和暂停中断对工作绩效的影响及其认知机制，并探讨疲劳在其中的调节作用。基于任务中断的 MFG 模型，通过改进 2-back 实验研究了中断前后的行为绩效和 ERP 变化，实验结果支持了所提出的假设。行为数据显示，中断后主任务正确率降低，反应时增加；在非疲劳状态下，由次要任务引发的中断会比单纯暂停的中断对中断后绩效的负面效应更强烈；相比非疲劳状态，疲劳状态下两种中断任务的行为绩效下降均更加明显。ERP 分析发现，中断后 P200 和 P300 波幅均显著升高，反映了中断对于注意加工和工作记忆的影响(Lenartowicz et al., 2010; 肖英霞, 2015)。

从行为数据来看，虽然任务中断和暂停中断均使得中断后的 2-back 任务出现了不同程度的绩效降低，但相比不中断的基线任务，两类中断任务的总绩效并没有出现显著下降。这是因为中断的出现反而对中断前试次产生了积极效应，即在经历一次中断后，在下一个中断到来之前，被试为弥补中断的负面影响产生了加速效应(Speedup)，积极主动地提高了其作业绩效(Trafton & Monk, 2007)。Ratwani 等人(2006)认为中断后的加速可归因于知觉加速，而并非认知系统的反应，Speier 等人(2003)表示，在相对简单或重复的任务中，人员具有较为充足的认知注意资源用于处理中断，且长时间简单重复的任务可能会造成无聊与分心，这时中断出现可以在短时间内对人员的行为表现有促进作用，中断任务使觉醒和压力水平上升，对后续作业的注意力更加集中，从而在简单的任务上表现得更好。但另一方面，当执行复杂任务时，额外的中断任务超出了执行者的认知能力。觉醒水平的提升反而可能会导致相关线索被忽视，使得完成主任务的时间更长，出错率增加(Speier et al., 1999)，这也就解释了一些研究得到了中断对相对简单主任务绩效有积极作用的结论的原因(Ratwani et al., 2006)。但这种

加速效应是以付出更多的努力为代价的，即补偿成本，这种补偿效应说明了补偿控制机制在绩效保护中的作用。补偿控制可视为对主任务绩效的保护与需投入的精神努力水平之间的权衡(Hockey, 1997)，在应对本研究中相对简单的 2-back 任务时，额外的努力很可能使被试主观脑力负荷增高。在疲劳状态下，能够明显的发现中断后行为绩效下降的更多，即使加速效应在一定程度上提高了中断前试次的绩效，但依旧对整体绩效没有明显的改善。此外，主任务总绩效没有出现显著性下降的另一个原因可能是中断频率并不高。中断主要导致了中断后绩效的下降而对中断前试次绩效并没有产生负面效应，中断频率高会导致中断后试次更多，从而使总绩效下降更明显。这与以往关于中断频率的研究结果是一致的，即越高的中断频率对任务总绩效的负面效应也就越大(Basoglu et al., 2009)。

从 P200 振幅变化来看，中断后试次诱发的振幅明显大于中断前试次。之前的研究表明，P200 作为对视觉刺激正常反应的一部分，反映了目标检测、注意力分配(Potts, 2004)、刺激转换(Stefanics et al., 2014)、记忆和重复效应(Luck, 2014)。在 n-back 任务中，P200 振幅变化与前额叶皮层(PFC)中注意力的早期分配和工作记忆更新期间的主动维持有关(Lenartowicz et al., 2010; Vilà-Balló et al., 2018)。在中断后试次中观察到 P200 振幅的显著增加则说明了无论是任务中断还是暂停中断，被试经历中断后对主任务的注意资源都有所减少：任务中断时不相关的次要任务信息造成了注意力资源的转移；暂停中断时缺少了持续刺激，被试对主任务投入的注意资源也逐渐减少。中断后再次出现的 2-back 任务则是需要重新投入注意资源的目标。虽然没有发现统计学上的显著性差异，但从描述统计分析来看，暂停中断后试次的 P200 振幅相较任务中断后试次更高，一个可能的原因与工作记忆的主动维持有关，一部分的被试表明在暂停期间能够通过多次回忆暂停前试次以保证恢复后的正确执行，从而导致了 P200 波幅的升高，但由于暂停时间较长而被试仅需回忆最后两个中断前试次，无需持续投入资源反复回忆，因此暂停中断和任务中断的中断后试次之间没有呈现统计学上的显著差异。P200 潜伏期通常被用作神经效率和速度的指标，进入疲劳状态后 P200 潜伏期略有上升，说明信息加工处理速度略有降低，有学者认为较短的 P200 潜伏期反映了更强的任务切换能力，中断后潜伏期的增长在疲劳后表现的更加明显(Wongupparaj et al., 2018)，这与被试的在中断后试次中反应时增加表现出一致性，也同时说明了疲劳对于任务切换能力的损害。

P300 振幅作为工作记忆的典型分析指标，涉及信息干扰控制、记忆的维持和更新等过程(Singh et al., 2018)。实验结果同样发现不论疲劳还是非疲劳状态，任务中断后 P300 平均振幅比中断前试次显著升高，这与以往类似的研究结果是一致的(Vilà-Balló et al., 2018; Zickerick et al., 2020)。与 P200 振幅变化趋势不同的是，P300 振幅在暂停中断前后的试次间

并没有显著性差异。一种假设理论认为，与注意力和记忆相关的 P300 的产生可能是由与抑制干扰信息相关的脑区激活引起的，P300 及其子过程能够反映神经对持续活动的快速抑制，有助于将传入的刺激信息从额叶转移到颞顶叶，从而增强记忆(Smith et al., 2013)。这一观点得到了神经生理学大量实验结果的支持，且研究证实了 P300 振幅与大脑抑制功能相关，随着抑制作用的增强而提高(肖英霞, 2015)。本研究的实验表明经历了任务中断后的 P300 幅值显著升高，在一定程度上证实了神经对中断过程中持续活动的快速抑制(Polich, 2007)，虽然中断任务干扰造成了注意力资源的剥夺，但是中断后被试投入更多的注意力资源抑制来自任务中断的干扰信息，使得 P300 振幅显著提高。而这一抑制现象并没有出现在暂停中断情况中，是因为并没有出现主任务之外的信息干扰，因此中断后试次的振幅才没有发生显著变化，更加说明了中断任务的信息对主任务工作记忆的干扰是导致中断后任务绩效下降的主要原因之一，这些结果为作业中断对主任务中断后绩效下降提供了来自 EEG 的证据。

从疲劳对 P300 振幅影响的主效应来看，心理疲劳的确会对大脑的注意和记忆加工造成损害(范晓丽等, 2018)，因此相比非疲劳组，各条件下试次的 P300 振幅均出现不同程度的降低，说明被试在疲劳状态下较难再调动太多的大脑资源，对信息加工的整体努力程度下降。疲劳对中断后工作记忆的进一步影响体主要现在：疲劳状态下任务中断和暂停中断的 P300 幅值的显著性差异，且在非疲劳状态下没有被发现这种差异性。这说明疲劳同时在对任务中断和暂停中断后的大脑记忆加工都造成负面影响的基础上，相比非疲劳情况，由于任务加工需求的增加，疲劳的任务中断后试次需要调用和投入更多的注意资源从而增强抑制功能，相应的也需要被试付出更多的努力(Kok, 2001)，P300 幅值即使在疲劳作用下也没有明显的降低；而暂停中断没有抑制无关信息的需求，因此在中断后仅受到疲劳作用的影响，P300 振幅变低，相应的行为绩效下降的也更加严重。

进一步与行为数据相对应，非疲劳中断后出现的 Speedup 加速效应，体现在任务中断和暂停中断的中断前试次 P300 振幅的小幅度增高(表 2)。而在疲劳状态下，虽然经历任务中断后较高的 P300 振幅也进一步证实了被试确实会付出更多的努力，但遗憾的是，这种补偿并没有使主任务总体绩效过多改变，从主观量表的评估结果也能够看出被试反而会感受到更多的脑力负荷和更强烈的困倦感。此外，P300 潜伏期被认为是分类速度的指标，反映了认知加工的速度，与检测和评估目标刺激所需时间成正比(Magliero et al., 1984)。而中断后试次相比中断前试次更长的潜伏期，说明中断暂时削弱了认知表现，使得中断结束后恢复至主任务的时间增长，即被试的反应时增加。

脑地形图分析结果表明前额-顶叶皮层网络在作业中断过程中发挥着重要作用。有学者

用脑成像扫描的方法研究前额叶-顶叶网络的功能，发现前额叶-顶叶网络与工作记忆及注意的运作密切相关，随着注意的转换和工作记忆信息量的增加，前额叶-顶叶网络的活动也会随之增强(Chen, 2007)，从而支持了本研究的实验结果。且中断过程中 P200 和 P300 成分的变化反映了中央执行控制的不同过程，可以认为 P200 与注意力转移有关，中断过程中不同类型的刺激触发了自上而下的注意转换，而 P300 则与无关信息抑制和工作记忆的更新更相关(Wongupparaj et al., 2018)，即被中断的主任务重新恢复时，注意力的重新定位和目标的重新激活通常会在速度和准确性上导致中断后绩效的下降(Couffe & Michael, 2017)。

综上所述，本研究的实验结果支持了前述所提到的中断认知的 MFG 模型(Altmann & Trafton, 2002)。如图 10 所示，和无中断的基线条件相比，中断期间被试对主任务的注意力资源减少，主任务记忆随时间快速衰退，需要在返回主任务后激活。疲劳损害了大脑的认知记忆功能，使得激活速率减慢从而出现了中断恢复的延迟，因此不论是任务中断还是暂停中断，中断后试次的绩效都出现了下降。相比以往研究结合 MFG 模型讨论了中断过程中记忆激活程度随时间的衰退机制(Altmann et al., 2017)，即暂停的原主任务记忆逐渐被遗忘从而较难恢复，本研究通过对比同等时长的任务中断和暂停中断进一步证实了中断任务对于记忆的干扰机制。相比暂停中断，任务中断干扰的出现需要激活新的次要任务相关目标，对主任务的工作记忆造成了更多损害。主任务的工作记忆激活程度随时间逐步衰退的同时，干扰也造成记忆激活程度相比无干扰的暂停中断降低的更多（图 10 中的黑色实线比蓝色线在中断时降低更多）。在中断后结束后，任务中断需要抑制来自次要任务不相关信息的干扰，将注意力重新集中到主要任务上，因而出现更长的恢复延迟，这就导致任务中断相比暂停中断绩效降低更多，也进一步增加了被试的主观脑力负荷。而疲劳的出现更是加剧了任务中断对工作记忆的负面效应，即使被试在中断后付出更多的努力去补偿中断带来的绩效下降，但最终并没能够对整体绩效形成过多的影响。由此可见，作业中断，尤其是疲劳状态下由次要任务引发的中断会对工作记忆以及与工作记忆相关的作业绩效产生强烈的消极影响。

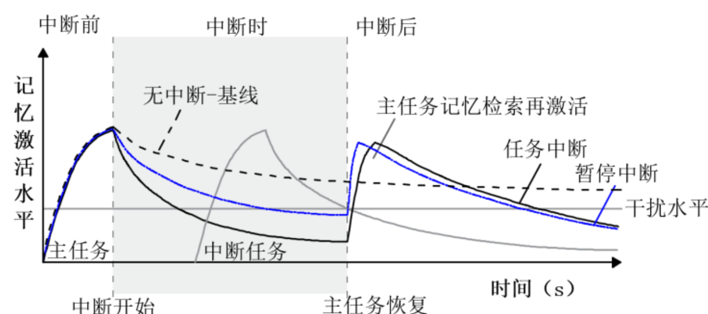


图 10 不同条件下的 P300 地形图

人机交互作业中的中断问题不能仅关注任务特征，作业者的自身状态对于中断的有效处理和作业绩效也具有至关重要的影响。而这一影响主要体现在中断后早期阶段注意力资源的分散导致任务切换能力的下降以及主任务重新激活时对中断任务的干扰抑制能力减弱。来自ERP 的证据——P200 潜伏期和 P300 振幅在不同心理疲劳状态下的变化证实了疲劳对于中断后绩效的调节作用。因此对于降低中断负面影响、有助于中断恢复的中断管理策略来说，除了考虑培训、人员选拔、界面辅助设计、中断出现时间管理等方法外(王水珍 等, 2014)，感知与监控人员状态，结合其当前的认知能力提供最佳的中断管理方法也是解决中断破坏性的有效途径之一。

本研究还存在一定的局限性。此实验的样本量较小，且所采用的主任务是相对单一且简单的空间 2-back 任务，经过练习后均能够较为熟练的执行，当执行需求较低时，有更多的资源可用来主动维护相关信息，也因此被试拥有较为充足注意力资源去处理中断，并产生加速效应使得中断前试次的绩效能够得到短暂的提高(Cellier & Eyrolle, 1992)。而面对实际环境中的人机交互作业，情况要比 2-back 范式复杂和困难许多，中断的出现使被试产生加速效应，尽力去弥补中断带来的负面作用，使得作业负荷大幅度提升，这在任何领域的作业中都是极其不利且危险的，长期以往不仅会对人员的健康造成损害，同时也威胁着整个系统的作业安全。因此对于许多研究得到的中断能够提高简单任务的绩效，降低复杂任务绩效的结论(Speier et al., 2003)，有待于在下一步的工作中展开更加深入的研究。

5 结论

本研究探究了作业中断对于中断后任务绩效影响的内在机制和疲劳在其中的调节作用，得到了以下结论：（1）作业中断，包括任务中断和暂停中断都会对中断后的工作绩效产生负面影响，主要是由于中断引发了注意力的分散以及来自中断期间无关信息的干扰作用，主要表现为 2-back 任务中断后 P300 和 P200 平均振幅的提高；（2）任务中断和暂停中断显著激活了前额-顶叶皮层网络，任务中断比暂停中断在中断后诱发了更大的 P300 波幅和顶叶区的激活，以抑制来自中断无关信息对主任务工作记忆的干扰；（3）疲劳状态会加剧中断对于注意资源、工作记忆及其相关行为绩效的负面作用，并导致任务中断后出现更为明显的加速效应。研究结果明确了作业中断过程的认知机理，通过暂停和任务中断证实了注意力机制和工作记忆机制在其中的作用，进一步支持了中断目标记忆模型的信息干扰机制，并为中断任务管理和绩效改善提供了理论支撑。

参考文献

Abe, N., Takeuchi, H., Ohki, A., Yanagida, O., Masaki, T., Mori, T., & Sugiyama, M. (2009). An examination of the relationship between

workload and fatigue within and across consecutive days of work: is the relationship static or dynamic? *Journal of Occupational Health Psychology*, *14*(3), 231-242.

Altmann, E. M., & Trafton, J. G. (2002). Memory for goals: an activation-based model. *Cognitive science*, *26*(1), 39-83.

Altmann, E. M., Trafton, J. G., & Hambrick, D. Z. (2017). Effects of interruption length on procedural errors. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 23(2), 216.

Anderson, J. R. (1983). *The architecture of cognition. Cambridge*, MA: Harvard University Press.

Basoglu, K. A., Fuller, M. A., & Sweeney, J. T. (2009). Investigating the effects of computer mediated interruptions: an analysis of task characteristics and interruption frequency on financial performance. International Journal of Accounting Information Systems, 10(4), 177-189.

Berry, A. S., Zanto, T. P., Rutman, A. M., Clapp, W. C., & Gazzaley, A. (2009). Practice-related improvement in working memory is modulated by changes in processing external interference. *Journal of Neurophysiology*, *102*(3), 1779-1789.

Boksem, M., Meijman, T. F., & Lorist, M. M. (2005). Effects of mental fatigue on attention: an ERP study. *Cognitive Brain Research*, 25(1), 107-116.

Brouwer, A.-M., Hogervorst, M. A., Van Erp, J. B., Heffelaar, T., Zimmerman, P. H., & Oostenveld, R. (2012). Estimating workload using EEG spectral power and ERPs in the n-back task. *Journal of neural engineering*, *9*(4), 045008.

Cellier, J.-M., & Eyrolle, H. (1992). Interference between switched tasks. *Ergonomics*, *35*(1), 25-36.

Chen, Y. N. (2007). *Working memory in n-back tasks : ERP studies* (doctorial dissertation). University of Warwick.

Ciecko-Michalska, I., Wójcik, J., Wyczesany, M., Binder, M., Szewczyk, J., Senderecka, M., Dziedzic, T., Slowik, A., & Mach, T. (2012). Cognitive evoked response potentials in patients with liver cirrhosis without diagnosis of minimal or overt hepatic encephalopathy: a pilot study. *Journal of Physiology and Pharmacology*, *63*(3), 271.

Clapp, W. C., Rubens, M. T., & Gazzaley, A. (2010). Mechanisms of working memory disruption by external interference. *Cerebral cortex*, *20*(4), 859-872.

Couffe, C., & Michael, G. A. (2017). Failures due to interruptions or distractions: a review and a new framework. *American journal of psychology*, *130*(2), 163-181.

Crowley, K. E., & Colrain, I. M. (2004). A review of the evidence for P2 being an independent component process: age, sleep and modality. *Clinical neurophysiology*, *115*(4), 732-744.

Dunn, B. R., Dunn, D. A., Languis, M., & Andrews, D. (1998). The relation of ERP components to complex memory processing. *Brain and Cognition*, *36*(3), 355-376.

Faber, L. G., Maurits, N. M., Lorist, M. M., & Lange, F. D. (2012). Mental fatigue affects visual selective attention. *Plos One*, 7(10), e48073.

Fan, X. L., Zhao, C. Y., Luo, H., & Zhang, W. (2018). An event-related potential objective evaluation study of mental fatigue based on 2-back task. *Journal of Biomedical Engineering*, *35*(06), 837-844.

[范晓丽, 赵朝义, 罗虹, 张伟. (2018). 基于 2-back 任务下 ERP 特征的心理疲劳客观评价研究. *生物医学工程学杂志*, *35*(06):837-844.]

Forester, G., Halbeisen, G., Walther, E., & Kamp, S.-M. (2020). Frontal ERP slow waves during memory encoding are associated with affective attitude formation. *International Journal of Psychophysiology*, 158, 389-399.

Hakim, N., Feldmann-Wüstefeld, T., Awh, E., & Vogel, E. K. (2020). Perturbing neural representations of working memory with task-irrelevant interruption. *Journal of cognitive neuroscience*, 32(3), 558-569.

Han, L., Liu, Y., Zhang, D., Jin, Y., & Luo, Y. (2013). Low-arousal speech noise improves performance in n-back task: an ERP study. *Plos One*, *8*(10), e76261.

Heath, C., Larrick, R. P., & Wu, G. (1999). Goals as reference points. *Cognitive Psychology*, *38*(1), 79-109.

Hockey, G. R. . (1997). Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload; a cognitive-energetical framework. *Biological Psychology*, 45(1–3), 73-93.

Hruby, T., & Marsalek, P. (2002). Event-related potentials-the P3 wave. *Acta neurobiologiae experimentalis*, *63*(1), 55-63.

Iqbal, S. T., & Bailey, B. P. (2005). Investigating the effectiveness of mental workload as a predictor of opportune moments for interruption.

CHI'05 extended abstracts on Human factors in computing systems, Portland, Oregon, USA, 1489-1492.

Kalgotra, P., Mania, R., & McHaney, R. (2019). Don't disturb me! Understanding the impact of interruptions on knowledge work: an exploratory neuroimaging study. *Information Systems Frontiers*, *21*(5), 1019-1030.

Kok, A. (2001). On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity. *Psychophysiology*, *38*(3), 557-577.

Laarni, J. (2021). Multitasking and interruption handling in control room operator work. In *Human Factors in the Nuclear Industry* (pp. 127-149). Elsevier.

Lenartowicz, A., Escobedo-Quiroz, R., & Cohen, J. D. (2010). Updating of context in working memory: an event-related potential study. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *10*(2), 298-315.

Liao, H. Y. (2017). *The effect of mental fatigue on working memory capacity in different-aged males* (master's thesis). Gannan Normal University.

[廖慧云(2017). *认知疲劳对不同年龄男性工作记忆广度的影响* (硕士学位论文). 赣南师范大学]

Lin, L., Leung, A. W., Wu, J., & Zhang, L. (2020). Individual differences under acute stress: Higher cortisol responders performs better on n-back task in young men. *International Journal of Psychophysiology*, *150*, 20-28.

Linden, D. V. D., Massar, S. A. A., Schellekens, A. F. A., Ellenbroek, B. A., & Verkes, R.-J. (2006). Disrupted sensorimotor gating due to mental fatigue: Preliminary evidence. *International Journal of Psychophysiology Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, *62*(1), 168-174.

Luck, S. J. (2014). *An introduction to the event-related potential technique*. MIT press.

Magliero, A., Bashore, T. R., Coles, M. G., & Donchin, E. (1984). On the dependence of P300 latency on stimulus evaluation processes. *Psychophysiology*, *21*(2), 171-186.

Marcora, S. M., Staiano, W., & Manning, V. (2009). Mental fatigue impairs physical performance in humans. *Journal of Applied Physiology*, *106*(3), 857-864.

McFarlane, D. C. (2002). Comparison of four primary methods for coordinating the interruption of people in human-computer interaction. *Human-Computer Interaction*, *17*(1), 63-139.

Meys, H. L., & Sanderson, P. M. (2013). The effect of individual differences on how people handle interruptions. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 57*(1), 868-872.

Monk, C. A., Boehm-Davis, D. A., & Trafton, J. G. (2004). Recovering from interruptions: Implications for driver distraction research. *Human Factors*, *46*(4), 650-663.

Monk, C. A., Trafton, J. G., & Boehm-Davis, D. A. (2008). The effect of interruption duration and demand on resuming suspended goals. *Journal of Experimental Psychology Applied*, 14(4), 299-313.

Owen, A. M., McMillan, K. M., Laird, A. R., & Bullmore, E. (2005). N‐back working memory paradigm: A meta - analysis of normative functional neuroimaging studies. *Human Brain Mapping*, *25*(1), 46-59.

Polich, J. (2007). Updating P300: an integrative theory of P3a and P3b. *Clinical neurophysiology*, *118*(10), 2128-2148.

Potts, G. F. (2004). An ERP index of task relevance evaluation of visual stimuli. *Brain and Cognition*, *56*(1), 5-13.

Puranik, H., Koopman, J., & Vough, H. C. (2020). Pardon the interruption: An integrative review and future research agenda for research on work interruptions. *Journal of Management*, *46*(6), 806-842.

Ratwani, R. M., Trafton, J. G., & Myers, C. (2006). Helpful or harmful? Examining the effects of interruptions on task performance. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, San Francisco, California, 50*(3), 372-375.

Rejer, I., & Jankowski, J. (2017). Brain activity patterns induced by interrupting the cognitive processes with online advertising. *Cognitive processing*, *18*(4), 419-430.

Saxby, D. J., Matthews, G., Warm, J. S., Hitchcock, E. M., & Neubauer, C. (2013). Active and passive fatigue in simulated driving: discriminating styles of workload regulation and their safety impacts. *Journal of experimental psychology: applied*, *19*(4), 287-321.

Singh, K. A., Gignac, G. E., Brydges, C. R., & Ecker, U. K. (2018). Working memory capacity mediates the relationship between removal and fluid intelligence. *Journal of Memory and Language*, *101*, 18-36.

Smith, J. L., Jamadar, S., Provost, A. L., & Michie, P. T. (2013). Motor and non-motor inhibition in the Go/NoGo task: an ERP and fMRI

study. *International Journal of Psychophysiology*, *87*(3), 244-253.

Speier, C., Valacich, J. S., & Vessey, I. (1999). The influence of task interruption on individual decision making: An information overload perspective. *Decision Sciences*, *30*(2), 337-360.

Speier, C., Vessey, I., & Valacich, J. S. (2003). The effects of interruptions, task complexity, and information presentation on computer-supported decision-making performance. *Decision Sciences*, *34*(4), 771-797.

Stefanics, G., Kremláček, J., & Czigler, I. (2014). Visual mismatch negativity: a predictive coding view. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*, 666.

Trafton, G. J., & Monk, C. A. (2007). Task Interruptions. *Reviews of Human Factors & Ergonomics*, *3*(1), 111-126.

Van der Linden, D., Frese, M., & Meijman, T. F. (2003). Mental fatigue and the control of cognitive processes: effects on perseveration and planning. *Acta Psychologica*, *113*(1), 45-65.

Vilà-Balló, A., Salmi, J., Soveri, A., Rodríguez-Fornells, A., Lehtonen, M., & Laine, M. (2018). Neural signatures for active maintenance and interference during working memory updating. *Biological psychology*, *132*, 233-243.

Wang, L., & Wu, L. (2012). Task interruptions of human-computer interaction: new issues in the new environment. *Journal of Psychological Science*, *35*(1), 88-92.

[王磊, 伍麟. (2012). 人机互动中的任务中断: 新环境中的新问题. *心理科学*, *35*(1), 88-92.]

Wang, S. Z., Ma, H. Y., Liu, T. F. , & Zhou, Z. K. (2014). Review of task interruption management: Based on human-computer interaction research. *Journal of psychological science*, 37(06):189-194.

[王水珍, 马红宇, 刘腾飞,等. 基于人机互动的任务中断管理研究述评[J]. *心理科学*, 2014, 37(06):189-194.]

Westbrook, J. I., Raban, M. Z., Walter, S. R., & Douglas, H. (2018). Task errors by emergency physicians are associated with interruptions, multitasking, fatigue and working memory capacity: a prospective, direct observation study. *BMJ Quality & Safety 27*(8), 655-663.

Wongupparaj, P., Sumich, A., Wickens, M., Kumari, V., & Morris, R. G. (2018). Individual differences in working memory and general intelligence indexed by P200 and P300: A latent variable model. *Biological psychology*, *139*, 96-105.

Xiao, Y. X. (2015). P300 and cognitive process: method, mechanism and application. *China Journal of Health Psychology*, *23*(009), 1425-1430.

[肖英霞. (2015). P300 与认知加工:方法,机制和应用. *中国健康心理学杂志*, *23*(009), 1425-1430.]

Yang, P. (2018). *Research on the maintenance and retrieval of object information in visual working memory* (doctor's thesis). University of Electronic Science and Technology of China.

[杨平. (2018). *客体信息在视觉工作记忆中的维持与提取研究*(博士学位论文). 电子科技大学.]

Zickerick, B., Kobald, S. O., Thönes, S., Küper, K., Wascher, E., & Schneider, D. (2021). Don't stop me now: Hampered retrieval of action plans following interruptions. *Psychophysiology*, *58*(2), e13725.

Zickerick, B., Thönes, S., Kobald, S. O., Wascher, E., Schneider, D., & Küper, K. (2020). Differential effects of interruptions and distractions on working memory processes in an ERP study. *Frontiers in Human Neuroscience*, *14*, 84.

Zhang, Y. (2009). *Effects of mental fatigue on attentional feature* (doctor's thesis). The Fourth Military Medical University.

[张焱. (2009). *脑力疲劳对注意特征的影响* (博士学位论文). 第四军医大学.]

Effects of interruption on work performance and the moderating effects of mental fatigue

CHEN Yueyuan[1,2], FANG Weining[1*], GUO Beiyuan[1], BAO Haifeng[1]

([1]*State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing, China*)

([2]*School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, China*)

Abstract

Task interruption is known to harm work performance, especially on working memory-related tasks. However, little is known about brain activity patterns during task interruption and the moderating effects of mental fatigue. The impact of work interruption on subsequent behavioral performance is mainly caused by affecting working memory (WM) and attention. Therefore, exploring the mechanisms underlying the impact of interruption on work performance in different fatigue states will improve and contribute to the development of the cognitive theory of interruption.

Combined with behavioral and electrophysiological data, we adopted the event-related potential (ERP) technique to explore the effect of interruption on working memory and the moderating role of fatigue on the interruption process. We designed a 2 (fatigue: fatigue, nonfatigue) ×2 (task type: task interruption, suspension interruption) ×2 (trial type: before interruption, after interruption) within-group design and added a noninterrupted baseline task as the control condition. The study randomly selected 20 healthy participants to perform spatial 2-back tasks in different fatigue states in various interruption conditions (math problem task interruption, suspension interruption and noninterrupted). A continuous performance test (AX-CPT) was used to induce fatigue before the fatigue session.

The behavioral data showed that accuracy in the primary task was reduced, and response time was increased after interruption. The behavioral performance decline in the primary tasks in the fatigue state was more significant than that in the nonfatigue state. ERP results showed that the P200 and P300 amplitudes induced by the 2-back task significantly increased after interruption. The P200 latency in the fatigue state was significantly shorter than that in the nonfatigue state; the latency with task interruption was longer than that with suspension interruption; and the latency after interruption trials was significantly longer than that before interruption trials. The P300 amplitude in the frontal lobe in the fatigue state was lower than that in the nonfatigue state. The amplitude difference between trials after interruption was more significant in the fatigue state than in the nonfatigue state. In addition, the P300 amplitude induced by task interruption was significantly higher than that induced by suspension interruption, while the same effect did not appear in the nonfatigue state.

In conclusion, work interruption caused a decrease in the attention resources available for the primary task after the interruption. The irrelevant information in the task interruption interfered with primary task performance (working memory task), and the fatigue state further aggravated the

negative effect of the interruption on working memory and attention. This research revealed the cognitive process underlying task interruption, identified the effects of fatigue and supported the memory for goals model of interruption.

Keywords Work interruption, Working memory, Attention processing, Fatigue